

# Untersuchungen zur langfristigen Entwicklung des Wasserhaushaltes von Oberflächenabdeckungen

U. HOEPFNER und A. NEUDERT

## Abstract

Rehabilitation of uranium mining sites of WISMUT involves placement of final covers on large areas. These covers consist of mineral substrates. Their water and gas balances have to be predicted for extended evaluation periods. Water balance simulations of single layer covers (storage and evaporation concept) taking current and future soil and climate conditions into account are performed with the HELP code.

## Zusammenfassung

Bei der Sanierung der Standorte des Uranerzbergbaues der WISMUT sind große Flächen endabzudecken. Der Wasser- und Gashaushalt der Abdeckungen aus mineralischen Substraten ist für lange Bewertungszeiträume zu prognostizieren. Für eine Einschichtabdeckung (Speicher- und Verdunstungskonzept) wird der Wasserhaushalt unter gegenwärtigen sowie zukünftigen Bedingungen der Boden- und Klimaentwicklung mittels HELP simuliert.

## 1. Einleitung und Problemstellung

Die DDR war in Zeiten des "Kalten Krieges" der weltweit drittgrößte Uranproduzent (nach den USA und Kanada) mit einer Gesamtproduktion von 220.000 Tonnen Uran bis 1990 und trug neben der UdSSR und CSSR wesentlich zur Uranversorgung des damaligen RGW-Wirtschaftsraumes bei. Nach der politischen Wende wurde die Produktion 1990 aus wirtschaftlichen Gründen beendet. Seitdem werden durch das Bundesunternehmen WISMUT die Hinterlassenschaften des Uranerzbergbaues saniert. Die Stilllegung und Sanierung in Sachsen und Thüringen ist dabei mit geschätzten Kosten von 14 Mrd. DM weltweit eines der größten Altlastensanierungsprojekte, die Bergbaufolgeland-

schaft bei Ronneburg (HOEPFNER et al., 2003c) sichtbares Zeichen der langjährigen Sanierungstätigkeit. Schwerpunkte der Sanierung sind dabei

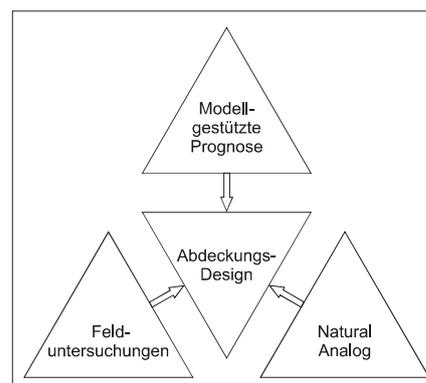
- die Flutung der untertägigen Grubengebäude in Aue, Königsstein und Ronneburg,
- die Sanierung der Haldenlandschaften in Aue, Königsstein und Ronneburg sowie die Rückverfüllung eines Tagebaurestloches bei Ronneburg und
- die Sanierung der Industriellen Absetzanlagen mit Schlämmen der Uranaufbereitung bei Seelingstädt und Crossen.

Eines der Umweltprobleme an den Bergbaustandorten ist die Bildung von sauren Sickerwässern mit hohen Schadstoffgehalten. Diese Bildung von *Acid Mine Drainage* ist eine Folge der Pyritverwitterung, die bei Sauerstoffzutritt eine Säurebildung und Auslaugung von Schwermetallen, Salzen und Radionukliden in den Bergmassen oder Schlämmen der Aufbereitung verursacht. Die Bildung von sauren Sickerwässern kann zum einen durch die Förderung von Neutralisationsreaktionen, zum anderen durch die Hemmung der Sauerstoffzufuhr verringert werden. Die Sauerstoffdiffusion wird durch eine dichtgelagerte Bodenüberdeckung wirksam reduziert. Einer der Sanierungsansätze ist deshalb die Abdeckung dieser Standorte durch mineralische Abdeckungen mit kombinierter hydraulischer und diffusionsminimierender Wirkung (*dry barrier*), so daß für große Flächen der Bergbaufolgelandschaft *Oberflächenabdecksysteme* zu konzipieren sind.

Die von den Genehmigungsbehörden angesetzten Zeiträume bei der Bewertung unterschiedlicher Abdeckvarianten sind mit 200 bis 1000 Jahren sehr lang und übersteigen um Größenordnungen sowohl die Beobachtungszeiträume, die während einer Planungs- oder Genehmi-

gungsphase möglich sind, als auch die Zeiträume, bei denen für Oberflächenabdeckungen sichere Wirksamkeiten angegeben werden können. Damit wird zum einen der Einsatz von *Prognosemethoden* und *-werkzeugen* zu einem wesentlichen Bestandteil des Auswahlverfahrens, zum anderen werden Konzepte, für die das Systemverhalten langfristig vorhersagbar ist, für die Variantenauswahl attraktiv. Hier ist das Konzept der *"natural analogues"* (WAUGH et al., 1994) anwendbar, wie es für die Beurteilung von Endlagern radioaktiver Abfälle entwickelt wurde (*Abbildung 1*).

Als "natürliches Vorbild" für die Konzipierung der Endabdeckung dienen dabei Vegetationsstandorte mit hoher Verdunstungsleistung, um die Sickerwassermengen zu reduzieren (*ET-Cover, Speicher- und Verdunstungskonzept*, HOEPFNER et al., 2001) sowie Böden mit hoher Unterbodenverdichtung, welche die Gasdiffusion durch ihre hohe Wassersättigung reduzieren können. Bei den Prognosen des Wasser- und Gashaushaltes der so konzipierten Endabdeckungen ist sowohl die langfristige Alterung der Bodensubstrate (Durchwurzelung, Gefügebildung) als auch die langfristige Entwicklung der meteorologischen Randbedingungen zu berücksichtigen.



**Abbildung 1: Methodischer Ansatz zur Konzipierung und Bewertung von Abdeckkonzepten, verändert nach WAUGH et al., 1994.**

**Autoren:** Dipl.-Geogr. Uwe HOEPFNER und Dr. Albrecht NEUDERT, WISMUT GmbH, Jagdschänkenstr. 29, D-09117 CHEMNITZ

## 2. Methodik

Zur Untersuchung des Wasser- und Gashaushaltes von Oberflächenabdeckungen wurden an verschiedenen Standorten Versuchsfelder angelegt, auf denen für die Abdeckkonzepte: *Speicherschicht-, Dichtschicht- und Kapillarsperrenkonzept* die jeweilige Wirksamkeit für einen Zeitraum von einigen Jahren untersucht wurde (hierüber wurde in HOEPFNER et al., 2003a und 2003b sowie PAUL et al., 2003 berichtet). Zusätzlich wurden auf natürlichen Standorten oder auf langjährig bewachsenen Halden Untersuchungen zur Durchwurzelung, zur Hydrologie dieser Standorte sowie zur Gasdiffusion in den Böden durchgeführt. Mittels Pedotransferfunktionen wurden Szenarien der Bodenentwicklung, mittels Skalierung von klimatischen Langzeitreihen wurden Szenarien der zukünftigen meteorologischen Verhältnisse erstellt.

Aufbauend auf die Felduntersuchungen wurden zur Langfristprognose der wasserhaushaltlichen Wirksamkeit der Abdecksysteme Simulationswerkzeuge eingesetzt. Hierfür wurden in einem ersten Schritt der Modellierung die Feldmessungen der Abflüsse und der Bodenhydrologie zur Kalibrierung des HELP-Modelles (ein "quasi-zweidimensionales, deterministisches, mit einem eintägigen Zeitschritt arbeitendes Schichtmodell", welches verbreitet zur Simulation des Wasserhaushaltes von Oberflächenabdeckungen eingesetzt wird, SCHROEDER et al., 2001; GDA, 2003) verwendet, in einem zweiten Schritt zunächst Sensitivitätsanalysen der Regelparameter des Wasserhaushaltes durchgeführt, um dann das validierte Modell zur Langfristprognose des Wasserhaushaltes einzusetzen.

## 3. Ergebnisse

Anhand einer einfachen Einschichtabdeckung für die Bergbaustandorte in Ostthüringen soll die mögliche langfristige Entwicklung des Wasserhaushaltes von Oberflächenabdeckungen gezeigt werden. Das simulierte Bodenprofil besteht aus einem 1 m mächtigen steinreichen Lehm über dem hoch verdichteten Haldenmaterial.

Anhand der Feldmessungen des hypodermischen Schichtabflusses in der Ab-

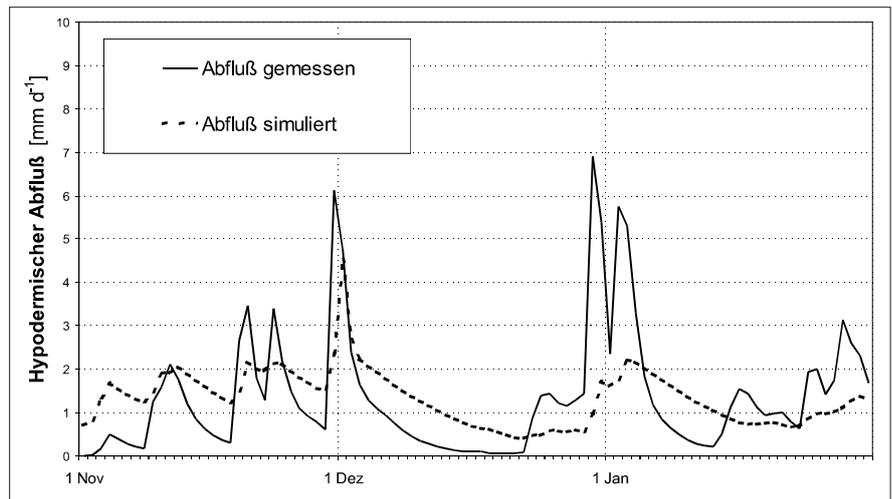


Abbildung 2: Kalibrierung des HELP-Modelles: Gemessener und simulierter hypodermischer Abfluß einer Oberflächenabdeckung (1 m mächtiges Einschichtsystem).

Tabelle 1: Mittlere Wasserbilanz einer Einschichtabdeckung des Typs ET-Cover, HELP-Modellierung. I: Kalibriertes Modell des Einbauzustandes bei rezentem Klima (1970-1999), II: Szenario der Bodenentwicklung bei rezentem Klima, III und IV: Klimawandel-Szenarien.

	P [mm a <sup>-1</sup> ]	PET [mm a <sup>-1</sup> ]	AET [mm a <sup>-1</sup> ]	Runoff [mm a <sup>-1</sup> ]	Interflow [mm a <sup>-1</sup> ]	Percolation [mm a <sup>-1</sup> ]
Szenario I	739	701	424	44	166	104
Szenario II	739	701	452	39	157	91
Szenario III	739	757	470	26	152	91
Szenario IV	555	757	405	11	75	65

deckung wurde HELP kalibriert und validiert. Die Gesamtabweichungen von simulierten zum gemessenem Abfluß betragen kumulativ < 1 mm bei einem mittleren Fehler von 0,9 mm d<sup>-1</sup> in der Kalibrierungsphase, und von kumulativ 8 mm bzw. 0,1 mm d<sup>-1</sup> in der Validierungsphase (HOEPFNER, 2005). Vergleicht man die gemessenen mit den simulierten Abflüssen (Abbildung 2), so zeigt sich, daß mit dem Modellansatz die kumulative Abflußmenge relativ gut prognostiziert werden kann, die Dynamik der Einzelereignisse jedoch geglättet wird.

Die mittlere langjährige Wasserbilanz kann damit mit einem so validierten Modell prognostiziert werden (Szenario I in Tabelle 1). Die Simulation einer 30jährigen klimatischen Reihe zeigt, daß schon unter den gegenwärtigen Bedingungen und der Modellannahme eines Grasbewuchses mit geringmächtiger Durchwurzelung der Abdeckung mit relativ geringen mittleren Sickerraten von ca. 100 mm bzw. 14 % zu rechnen ist, bedingt durch die nur leicht positive mitt-

lere klimatische Wasserbilanz und ein für dieses Abdeckkonzept günstiges Verhältnis von Winter- zu Sommerniederschlägen von 3 zu 4.

Sensitivitätsuntersuchungen zeigen eine hohe Sensitivität der Wasserbilanz von Boden- und Klimaparametern. Hohe Sensitivitätsindizes wurden dabei vor allem für die klimatischen Parameter Niederschlag und Lufttemperatur sowie für den Bodenparameter hydraulische Leitfähigkeit bestimmt (Beispiele der Sensitivitätsuntersuchungen zeigen Abbildungen 3 und 4).

Mittels dieser sensitiven Parameter wurden drei Szenarien der zukünftigen möglichen langfristigen Entwicklung des Wasserhaushaltes abgeleitet. Das Szenario II "Bodenentwicklung" geht dabei von einer Auflockerung der Rekultivierungsschicht aus (Erhöhung der hydraulischen Leitfähigkeit um den Faktor 100) sowie einer zunehmenden Vegetationsentwicklung und Durchwurzelung (Verdoppelung von LAI und maximaler Tiefe des transpirativen Wurzelzuges).

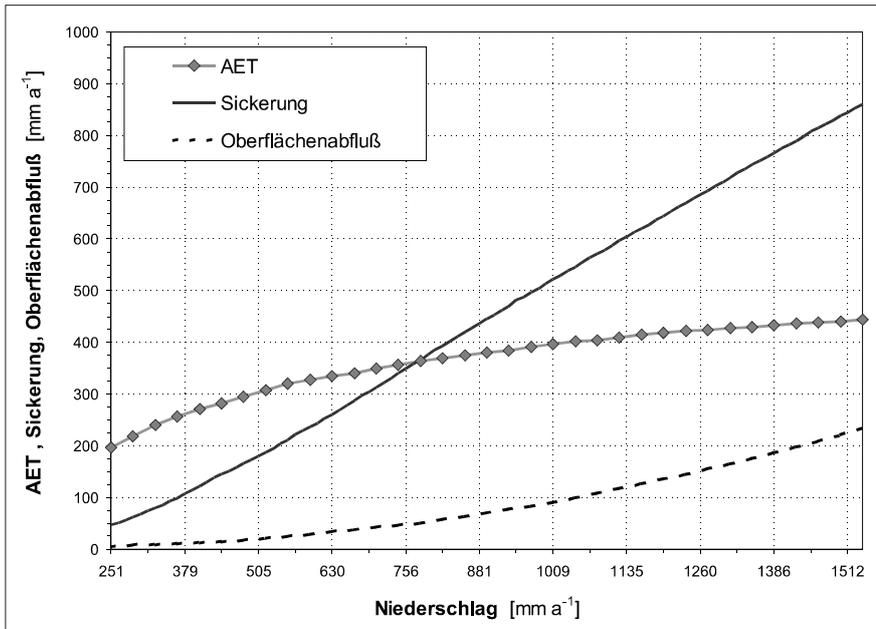


Abbildung 3: Sensitivität der Aktuellen Evapotranspiration, der Sickerung und des Oberflächenabflusses einer Oberflächenabdeckung (Einschichtsystem, HELP-Modell) bei Variation des Niederschlags.

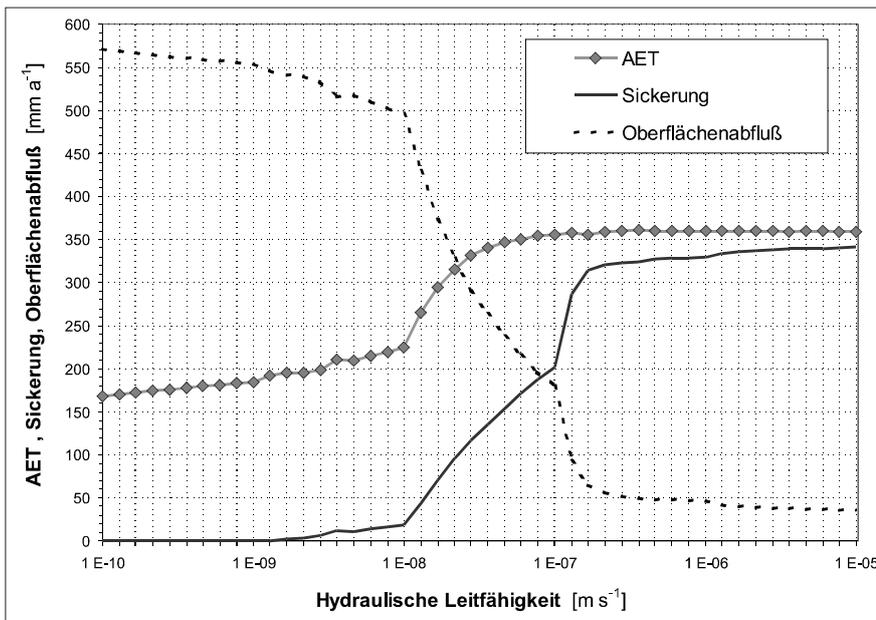


Abbildung 4: Sensitivität der Aktuellen Evapotranspiration, der Sickerung und des Oberflächenabflusses einer Oberflächenabdeckung (Dreischichtsystem, HELP-Modell) bei Variation der hydraulischen Leitfähigkeit des Oberbodens.

Regionale Klimaprognosen (ENKE, 2001) zeigen für Sachsen, daß bis 2050 mit einer Temperaturerhöhung von  $> 2,5^\circ \text{C}$  und geringeren Jahresniederschlagsmengen zu rechnen ist, vor allem in den Frühjahrs- und Sommermonaten (Rückgang bis zu 20 mm pro Monat) bei gleichzeitiger Zunahme der Niederschlagsdynamik. Zur Prognose der Auswirkung dieser Änderungen der klimatischen Randbedingungen auf den Wasser-

haushalt der Oberflächenabdeckung wurde in zwei *Klimawandel*-Szenarien die Temperatur linear um  $2,5$  Grad erhöht bei Beibehaltung der sonstigen Parameter des Bodenentwicklungsszenarios (Szenario III) und in Szenario IV zusätzlich der Niederschlag linear um  $25\%$  verringert.

Die Ergebnisse der Szenarienrechnungen zeigen, daß die langfristige Entwicklung des Bodens sowie der atmosphärischen

Randbedingung erwartungsgemäß zu einer Verringerung der Abflüsse führt. Im Szenario IV, welches sowohl eine Bodenentwicklung als auch den Klimawandel berücksichtigt, sind gegenüber dem Einbauzustand der Abdeckung der Oberflächenabfluß auf etwa ein Viertel reduziert, der hypodermische Abfluß auf ca. die Hälfte und die Sickerwassermenge auf ca.  $60\%$ . Diese Trends führen also zu einer zusätzlichen Stützung des Konzepts der ET-Cover.

#### 4. Ausblick

Die Simulation des Wasserhaushaltes von Böden, natürlichen oder anthropogenen, ist trotz der weiten Verbreitung und Anwendung von Standardwerkzeugen der Modellierung nach wie vor mit großen Unsicherheiten behaftet, weshalb eine Modellkalibrierung und -validierung als zwingend notwendig angesehen wird. Vor dem Hintergrund sehr hoher Sensitivitäten der relevanten Wasserhaushaltskomponenten auf die Eingabeparameter, die bei Prognosezeiträumen von Jahrhunderten oder Jahrtausenden ebenfalls zeitlich variabel zu betrachten sind, ist die Frage der Güte der Modellprognosen neu zu stellen. Auch die Prognose eines validierten Modells ist immer "history matching" (KONIKOW et al., 1992).

Damit steigt mit der zunehmenden Komplexität der Modellierung die Bedeutung von Feldbeobachtungen des Wasserhaushaltes, seien es Lysimeteruntersuchungen oder sonstige Feldmessungen der Bodenfeuchte oder der Abflüsse, welche für lange Zeiträume die Prozesse des Wasserhaushaltes unter variablen Boden-, Klima- und Nutzungsverhältnissen erfassen.

#### Literatur

- ENKE, W., 2001: Regionalisierung von Klimamodell-Ergebnissen des statistischen Verfahrens der Wetterlagenklassifikation und nachgeordneter multipler Regressionsanalyse für Sachsen. Abschlußbericht, Inst. Meteorologie, FU Berlin.
- GDA, 2003: Modellierung des Wasserhaushaltes der Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien. Deutsche Geotechnische Gesellschaft, GDA-Empfehlung E 2-30 (Entwurf).
- HOEPFNER, U., 2005: Alternative Oberflächenabdeckungen: Das Konzept der "ET Caps" und ihr möglicher Einsatz bei der Verwahrung von Halden und Tailings der WISMUT (Arbeits-

- tel). Dissertation, Ruhr-Universität Bochum. In Vorbereitung.
- HOEPFNER, U., S. JAHN, G. NEUBERT und M. PAUL, 2003a: Lysimeteruntersuchungen zum Wasser- und Stofftransport bei der Haldensanierung des Uranerzbergbaus in Thüringen. In: BAL (Hrsg.): 10. Gumpensteiner Lysimetertagung, S. 179-180.
- HOEPFNER, U., G. NEUBERT und H. ZEPP, 2001: Die Oberflächenabdeckung von Halden des Uranbergbaus: Alternative Konzepte, Untersuchungsmethodik und erste Ergebnisse. Mitteilungen Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft, Bd. 96, S. 81-82.
- HOEPFNER, U., A. NEUDERT und M. PAUL, 2003b: Lysimeteruntersuchungen zum Wasserhaushalt von Endabdeckungen zur Sanierung von Tailings des Uranerzbergbaus in Sachsen. In: BAL (Hrsg.): 10. Gumpensteiner Lysimetertagung, S. 181-182.
- HOEPFNER, U. und M. PAUL, 2003c: Die Bergbaufolgelandschaft bei Ronneburg. In: LIEDTKE, H., MÄUSBACHER, R. u. SCHMIDT, K.-H. (Hrsg.): Relief, Boden und Wasser. Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland. Institut für Länderkunde, Leipzig, S. 52-53.
- KONIKOW, L. and J. BREDEHOEFT, 1992: Ground-water models cannot be validated. *Advanc. Wat. Res.*, Bd. 15, S. 75-83.
- PAUL, M., U. HOEPFNER, B. ESCHRICH, S. JAHN and G. NEUBERT, 2003: Vadose zone monitoring of soil covers for acid generating waste rock at the Ronneburg uranium mining site. *Proc. Sudbury 03 Mining and the environment*.
- WAUGH, W., K. PETERSEN, S. LINK, B. BJORNSTAD and G. GEE, 1994: Natural analogs of the long-term performance of engineered covers. In: GEE, G. u. WING, N. (Hrsg.): *In-situ remediation: scientific basis for current and future technologies. Proc. 33. Hanford Symposium on Health and the Environment*, Pasco, 7-11.11.94, S. 379-409.